

Effekte der multimodalen Wellenausbreitung in Ultraschall-Clamp-On-Systemen

Ulrike Hempel, Sebastian Woeckel

Institut für Automation und Kommunikation (ifak) e.V. Magdeburg, Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg

Joerg Auge

Hochschule Magdeburg-Stendal, IWID - Institut für Elektrotechnik, Postfach 3655, 39011 Magdeburg

Zusammenfassung

Im Rahmen industrieller Anwendungen bietet die nicht-invasive Clamp-On-Konfiguration von Ultraschall-Messsystemen die Möglichkeit der Prozessanbindung an bereits im Betrieb befindliche Reaktoren oder Rohrsysteme, ohne den Prozess stoppen zu müssen. Trotz unkomplizierter und kostengünstiger Inbetriebnahme birgt das Prinzip auch Nachteile, da aufgrund von Mehrfachreflexionen an den Grenzflächen oder sekundären Ausbreitungswegen über die Rohrwand (Festkörper-Störschall) unerwünschte (Stör-)Signale entstehen, die die gesuchten Signalinformationen überlagern können. Die genaue Erfassung der eigentlichen Messgröße ist dadurch erheblich erschwert, im Extremfall sogar unmöglich. Um die Zuverlässigkeit der Clamp-On-Systeme zu verbessern und Störgrößen sicher vom gesuchten Nutzsignal trennen zu können, ist eine anspruchsvolle Signalanalyse sowie genaue Kenntnis aller Ausbreitungswege in Abhängigkeit von der Ultraschallwandlerposition und der jeweiligen Ausbreitungseigenschaften notwendig ([1], [2]).

Der Beitrag adressiert folglich Phänomene der multimodalen Clamp-On-Schallausbreitung in flüssigkeitsgefüllten Rohren und stellt dabei als konkrete Anwendung die Ultraschall-Tomografie zur orts aufgelösten Prozesscharakterisierung in den Mittelpunkt, welche die Applikation mehrerer über den Umfang verteilter Wandler erfordert. Auf Basis einer reduzierten Modellierung werden mögliche Ausbreitungspfade, Schall-Laufzeiten und Mehrfachreflexion im Rohr abgeschätzt. Mit Hilfe ergänzender FEM-Analysen soll der Einfluss von Modenkonversionseffekten auf das Messsignal beurteilt und so störende, oftmals dominierende Anteile im Gesamtsignal bewertet werden. Dabei ist von Interesse, inwieweit die Veränderung bestimmter Parameter der Impulsantwort entlang einer definierten Übertragungsstrecke vorhergesagt oder Zeitfenster im aufgezeichneten Messsignal, in denen keine signifikanten Störeffekte (Mehrfachreflexion, dispersive Schallausbreitung) auftreten, identifiziert werden können. Die Arbeiten sollen so dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Clamp-On-Messsysteme zu verbessern und eine größere Toleranz gegenüber unerwünschten (Stör-)Signalen zu erreichen.

Lineares Modell der Schallausbreitung

Betrachtet man den Querschnitt einer mit homogener Flüssigphase befüllten Rohrstruktur (**Bild 1a**) und nimmt an, dass die lateralen Dimensionen von Rohr und Medium größer sind als die aktive Wandlerfläche, so kann die Schallausbreitung anhand eines reduzierten, eindimensionalen Modells mit den einzelnen Schichten d_i beschrieben werden (Bild 1b). Die gewählte Vereinfachung setzt dabei einen geringen Öffnungswinkel des Schallfeldes entlang der Wandlerachse voraus [3]. Dadurch ist es möglich, die Ultraschallausbreitung im Rohr und Medium sowie die damit verbundenen Effekte auf das Empfangssignal auf Grundlage der Mason-Theorie zu beschreiben [4]. Mit dem linearen Modellierungsansatz wird das Ziel verfolgt, die wesentlichen Kennwerte des sich ausbreitenden Signals in homogenen geschichteten Medien hinreichend analytisch wiederzugeben, anstatt eine vollständige Beschreibung der realen Ausbreitung einer multimodalen Schallwelle in komplexen Strukturen zu ermöglichen. Wesentliche Kennwerte des Modells sind die einfallende $a(\omega)$, transmittierte $b_T(\omega)$ und reflektierte $b_R(\omega)$ Schallwelle, die Koeffizienten der Transmission (T_i) in den Schichten und der Reflexion (I_i) an den Grenzflächen sowie die elektromechanische Signalwandlung durch die Schallwandler [5]-[7]. Im Ergebnis kann ein analytischer Ausdruck abgeleitet werden, der sämtliche Mehrfachreflexionen entlang des Ausbreitungsweges beschreibt. Das Modell liefert demnach eine Abschätzung der zeitlichen Folge sämtlicher zu erwartenden direkten und mehrfach reflektierten Signale, anhand derer das optimale Signalfenster gewählt werden kann. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt

werden, dass alle Ausbreitungswege, die nicht vom Modell betrachtet werden, einen zusätzlichen Störfaktor beim Vergleich der analytischen Lösung mit den Messdaten hervorrufen.

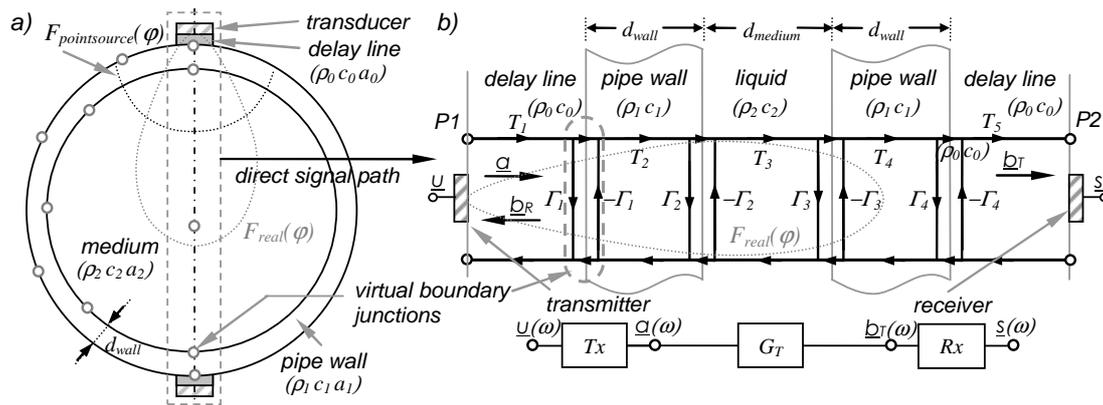


Bild 1 a) Schema: Rohrquerschnitt mit Ultraschallwandlern (V323-SU $f = 2.25$ MHz, $B = 2$ MHz) in Clamp-On-Konfiguration sowie reduziertes lineares Modell der multimodalen Schallausbreitung und Modenkonzersion an den Grenzflächen, b) Schichtsystem entlang der Hauptausbreitungsrichtung und entsprechendes lineares Modell (Annahme: $F_{real}(\varphi)$ mit Richtwirkung $\gg 1$, keine Modenkonzersion an den Grenzflächen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung).

Studien zur akustischen Durchschallung an geschichteten Systemen haben jedoch gezeigt, dass die Ausbreitung einer longitudinalen Schallwelle bei mehreren Übergängen zwischen flüssigen und festen Phasen mit einem vernachlässigbaren Fehler berechnet werden kann. Die Laufzeit der Longitudinalwelle (nach Durchlaufen des Rohres und Mediums), die Ausbreitung innerhalb der Rohrwand und die ersten Mehrfachreflexionen können so mit einer Genauigkeit $>90\%$ selbst unter vereinfachenden Annahmen (keine Konversionseffekte, Divergenz, Linseneffekte) abgeschätzt werden. Auf dieser Grundlage kann eine zuverlässige zeitliche Fensterung der relevanten Messsignal-Anteile erfolgen. Im Fokus gegenwärtiger Arbeiten steht die Anpassung des Modells an gekrümmte Flächen und parallele Ausbreitungswege und -moden. Modenkonzersionen, z.B. an Fest-Flüssig-Grenzen, lassen sich durch die Verwendung von Tensoren einbeziehen. Die Transmissionsfunktionen und die Reflexionsfaktoren sind dann mehrdimensional entsprechend der Anzahl der zulässigen Moden. Zunächst soll dabei jeder Wellenmode getrennt ohne Modenkonzersion betrachtet werden.

Simulation der zweidimensionalen Schallausbreitung

Ausgehend vom reduzierten, eindimensionalen Modell der Schallausbreitung an geschichteten Strukturen sollen nachfolgend Ergebnisse numerischer Studien beschrieben werden, die den Einfluss von Sekundäreffekten (Divergenz, Modenkonzersion) untersuchen. So ist es möglich, Schlussfolgerungen für die notwendigen Ergänzungen im vereinfachten Modellierungsansatz ziehen zu können. Gleichzeitig dienen die Studien auch dazu, das multimodale Schallausbreitungsverhalten in homogenen und mehrphasigen Stoffsystemen in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter zu untersuchen.

Die Formulierung der Wellengleichung in homogenen, nicht dispersiven Medien in Form von partiellen Differenzialgleichungen stellt die Grundlage des verwendeten Modells finiter Elemente dar. Als Simulationsumgebung wurde Comsol Multiphysics® gewählt. Die Definition der Medieneigenschaften erfolgt unter Annahme der Linearität durch analytische Funktionen. Die Linearität bedingt, dass die Medieneigenschaften unabhängig von der Amplitude der eingepprägten Druckwelle sind. Diese Voraussetzung ist i.d.R. für ultraschallbasierte Messverfahren erfüllt.

Ausgehend davon konnte anhand einer 2-dimensionalen Simulationsstudie das Verhalten longitudinaler Schallkomponenten in einer Clamp-On-Konfiguration (Kunststoffrohr DN 100, Medienbefüllung: Wasser) im Fall einer Impulsanregung (200 kHz differenzierter Gaußimpuls) abgeschätzt werden. **Bild 2** verdeutlicht anhand der entstehenden transienten Schallwellen, dass sich neben der direkten Welle (a) zusätzliche Komponenten innerhalb des Rohres (c) sowie mehrfache Reflexionen an der Rohrwand (d) und durch Modenkonzersion erzeugte Wellen (b, e) ausbilden. Insbesondere die longitudinale Komponente in der Rohrwand (c), die sich entlang der Rohrwand ausbreitet, bewirkt sowohl die Erzeugung einer Körperschallwelle (vorrangig an der schallharten Grenzfläche lokalisiert) und eine modenkonzertierte Welle (b) im Medium selbst. Am Rohrumfang platzierte (virtuelle) Empfänger würden demnach verschiedene komplexe Signalanteile registrieren, deren Charakterisierung, z.B. für Zwecke der Flüssigkeitsanalyse, nicht ohne zusätzliche Sekundärin-

formationen durchgeführt werden könnte. Deutlich wird dies beispielsweise in Bild 2 (rechts), bei dem die korrekte Laufzeitmessung bei direkter Durchschallung durch sekundäre Schallsignale in der Rohrwand erschwert wird.

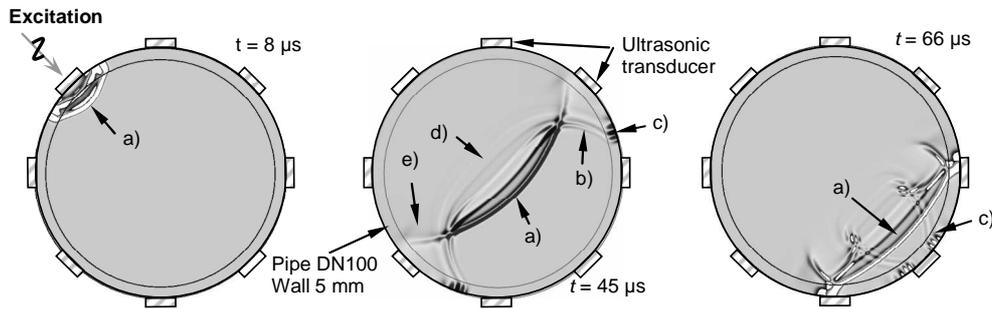


Bild 2 Ausbreitung eines 200 kHz-Impulses sowie Entstehung verschiedener Wellenmoden in Medium und Rohrwand.

Ein weiteres Anwendungsszenario betrifft die Füllstandsmessung oder Grenzflächenbestimmung zweier homogener Phasen. Ausgehend von der in **Bild 3** gezeigten Konfiguration für eine Öl-Wasser-Schichtung kann die im Reflexionssignal enthaltene Grenzschichtinformation durch weitere, z.T. dominierende Signalanteile beeinflusst - im Fall ungünstiger Verhältnisse von Rohrdimensionen, Schallgeschwindigkeit und Sensorpositionen sogar maskiert - werden. Für den Fall ansteigender Füllhöhen des Wassers ($h = 10 \dots 90$ mm) ist dies in **Bild 4** anhand der Sonogramme gezeigt. Es wird deutlich, dass in Abhängigkeit der gewählten Wandlerpositionen die Füllhöhenbestimmung durch Beseitigung der Störsignale (Hintergrundsubtraktion) verbessert und im Fall $h > 80$ mm sogar erst möglich wird.

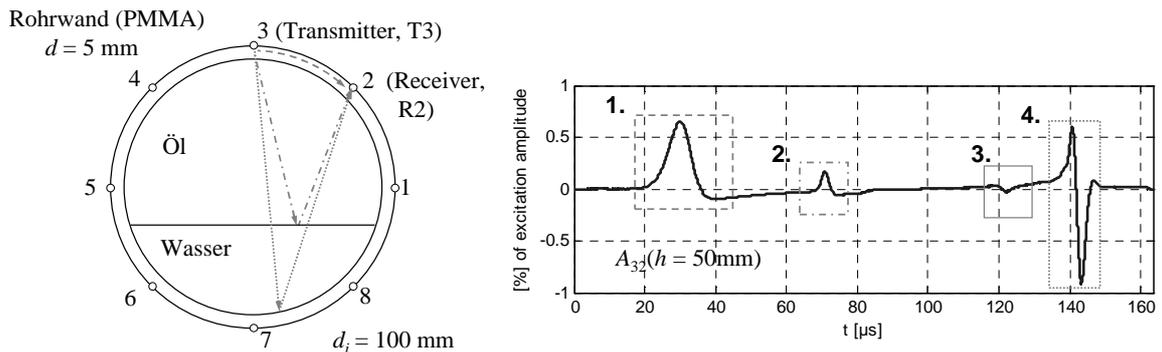


Bild 3 Füllstandsmessung unter Annahme einer Punktquelle (T3) an einem mit Öl-Wasser gefüllten Rohr: links) Schema des Querschnitts ($d_i = 100$ mm Durchmesser, $d = 5$ mm Rohrwandstärke, 8 Sensoren), rechts) Empfangssignal an Position 2 (R2) für einen Füllstand $h = 50$ mm (Anregung: differenz. Gaussimpuls $f_0 = 200$ kHz Bandbreite und auf den Schalldruck in der Rohrwand normierte Amplitude). Hauptausbreitungspfade: 1. Welle im Rohr, 2. Reflexion an Mediengrenzfläche, 3. füllstandsabhängiges Sekundärsignal und 4. Rückwandecho.

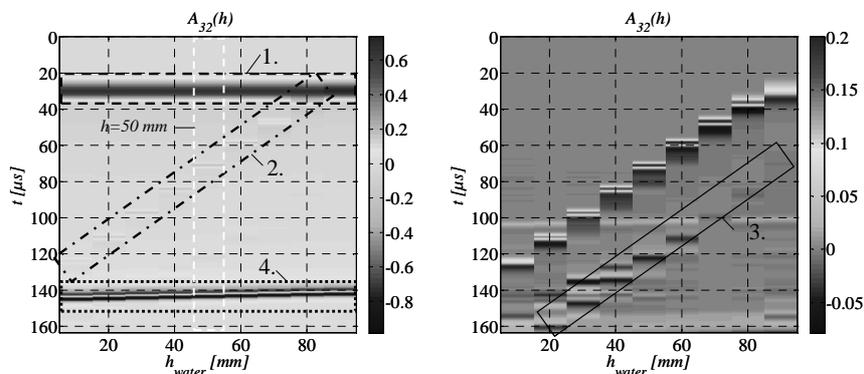


Bild 4 Sonogramm (normierte Schalldruckamplitude) der Signale $A_{32}(h)$ der Clamp-on Anordnung aus Bild 3 mit steigender Füllhöhe im Rohr. Links) Originalwerte, rechts) nach Hintergrundsubtraktion mit deutlicher Grenzflächen-Reflexion und füllstandsabhängigem Signal „3“.

Die gezeigten Beispiele verdeutlichen den Einfluss von Geometrie und akustischen Eigenschaften des Rohres auf die Schallausbreitung. Ausgehend von der Konfiguration in Bild 3 sind daher die wichtigsten Effekte in einer numerischen 2D-Studie und anhand analytischer Abschätzungen zu den Schall-Laufzeiten untersucht worden. Demnach kann gezeigt werden, dass die sich in der Rohrwand ausbreitenden Schallwellen einerseits durch eine schnelle quasi-longitudinale „Oberflächenwelle“ entlang des Umfangs sowie durch Mehrfachreflexionen an der Grenzfläche Medium-Rohrwand entlang des Rohrquerschnitts entstehen. Beide Effekte verstärken sich, wenn die Wellenlänge in der Rohrwand einem ganzzahligen Vielfachen der Rohrwanddicke entspricht, weswegen durch die Wahl geeigneter Anregungsfrequenzen entsprechende Störeffekte vermieden werden können. Der Einfluss des schnellen Modes auf das Messsignal kann ferner durch die Gestaltung der Randbedingungen an der Rohraußenwand minimiert werden, indem durch Impedanzanpassung Energie aus dem Rohr ausgekoppelt und absorbiert wird (z.B. durch Dämm-Matten).

Ein weiterer, jedoch weniger ausgeprägter Einfluss auf das Messsignal ergibt sich durch die spezifische Medienfüllung. In Abhängigkeit der akustischen Impedanzen der (geschichteten) Phasen und deren Grenzschichten ändert sich die Charakteristik des durch Modenkonversion an der Rohrinneenseite entstehenden und sich im Festkörper ausbreitenden Schallanteils, wodurch das Messsignal eine weitere und zudem füllstandsabhängige (Stör-)Signatur erhält.

Zusammenfassung

Für Clamp-On-Anwendungen, bei denen Wandler mit hoher Richtwirkung eingesetzt werden, können Schallausbreitungsphänomene durch den Ansatz der linearen Modellierung hinreichend gut beschrieben und die interessierenden Nutzsignale unabhängig von störenden Einflussfaktoren (z.B. Mehrfachreflexionen in der Rohrwand) abgeschätzt werden. Mit der Modellierung ist es im Vorfeld einer Anwendung möglich, den Einfluss der Anregungsfrequenz, der Wandlerpositionen oder der Rohreigenschaften (Material, Geometrie) auf das Messsignal einzuschätzen und das Messsystem optimal auszulegen. Aufwändige Einricht- und Kalibriermaßnahmen könnten so reduziert werden. Darüber hinaus ist es möglich, auch die Signalkomposition nicht-veränderbarer Clamp-On-Anordnungen hinsichtlich Nutz- und Störsignalanteil zu bewerten, um so die Messinformation bestmöglich zu extrahieren.

Über die Modellierung hinausgehend verdeutlichen die vorgestellten Ergebnisse, dass ein nicht unerheblicher Störanteil durch die Ausbreitung der schnellen, quasi-longitudinalen Schallkomponenten in der Rohrwand bestimmt wird. Obgleich dieser Effekt derzeit nicht durch ein reduziertes Modell nachgebildet werden kann, lassen die Studien den Schluss zu, dass eine Minimierung des Störsignals durch die Anpassung der Anregungs-/ Wandlerfrequenz an die Rohrwanddicke und des akustischen Übergangs zur Umgebung (impedanzangepasst) erreicht werden kann.

Danksagung

Das Vorhaben wird durch Haushaltsmittel des BMWi im Rahmen des Programms INNO-WATT finanziell unterstützt (FKZ: IW091065).

Literatur

- [1] M.H. Fazalul Rahiman et. al: „Modelling Non-Invasive Ultrasonic Tomography for Industrial Liquid/Gas Flow Application“, Proc. Int. Conf. “Modeling, Simulation & Visualization Methods (MSV'06)”, 2006.
- [2] P. Holstein, H.J. Münch: „Handling großer Datenmengen in der Schallemission – ein Beitrag zur Algorithmenentwicklung“, DGZfP-Jahrestagung, 2009.
- [3] J. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Berlin, ISBN-10: 3540157549.
- [4] S.J. Mason: Further Properties of Signal Flow Graphs, Proc. Institute of Radio Engineers, vol. 44, nr. 7.
- [5] S. Wöckel, U. Hempel, J. Auge.: Phase boundary characterization in liquids by acoustic waves. Special Issue Measurement Science Technology, Meas. Sci. Technol. 20 124013 (6pp).
- [6] U. Hempel, S. Wöckel, J. Auge.: Ultraschallbasierte Informationsgewinnung in der Verfahrenstechnik. Chemie- und Ingenieurtechnik 2010, 82, No.4, S. 491-502.
- [7] S. Wöckel, U. Hempel, J. Auge: Tomographical monitoring of processes with multicomponent and multiphase fluid mixtures. EUROSENSORS XXII, 07.-10.09.2008, Dresden, Tagungsband auf CD, S. 761-764.